Revista Internacional de
Ingeniería
de Estructuras

Vol. **23**, **3**, 341-356 (2018)

EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE USE OF THE ARDUINO UNO SENSOR FOR THE DETERMINATION OF ACCELERATIONS AND DISPLACEMENTS IN STRUCTURES

R. Moreano [(1)], P. Caiza [(2)]

[1] Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Av. General Rumiñahui s/n Valle de los Chillos, Ecuador. rjmoreano@espe.edu.ec
[2] Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Av. General Rumiñahui s/n Valle de los Chillos, Ecuador. pecaiza1@espe.edu.ec

Received: August 2018. Accepted: September 2018

ABSTRACT

The sensor proposed in the investigation is the Arduino UNO, which is a low-cost device that collects acceleration data with similar accuracy as that of higher-cost sensors that require periodic maintenance; it reduces the cost in the monitoring of structures, providing reliable data for the analysis of buildings.

The validation is performed experimentally in the laboratory with the use of a seismic simulation table to generate the dynamic loads, which are applied to the test structure.

The Arduino UNO sensor and commercial accelerometers are used to collect the accelerations and the LVDT device to obtain the displacements in real time, by the configuration of the test structure vibrations are generated that are filtered later in the data analysis. The displacements are calculated from the accelerations obtained from the Arduino UNO sensor and the accelerometers, applying the relevant calculations.

Finally, the results obtained from the Arduino UNO sensor and commercial accelerometers are compared with the results of the LVDT device, to define the validation of the sensor.

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL USO DEL SENSOR ARDUINO UNO PARA LA DETERMINACIÓN DE ACELERACIONES Y DESPLAZAMIENTOS EN ESTRUCTURAS

RESUMEN

El sensor propuesto en la investigación es el Arduino UNO, el cual es un dispositivo de bajo costo que recolecta datos de aceleraciones con similar exactitud que la de sensores de mayor costo y que requieren de un mantenimiento periódico;

por lo que reduce el costo en el monitoreo de estructuras, brindando datos confiables para su análisis.

La validación se la realiza de forma experimental en laboratorio con el uso de una mesa de simulación sísmica para generar las cargas dinámicas, las cuales son aplicadas a una estructura de prueba.

Se usa el sensor Arduino UNO y acelerómetros comerciales para recolectar las aceleraciones y el dispositivo LVDT para obtener los desplazamientos en tiempo real. Por la configuración de la estructura de prueba se generan vibraciones que son filtradas posteriormente en el análisis de datos. Se calculan los desplazamientos a partir de las aceleraciones obtenidas del sensor Arduino UNO y los acelerómetros, aplicando los cálculos pertinentes.

Finalmente se comparan los resultados obtenidos del sensor Arduino UNO y los acelerómetros comerciales con los resultados del dispositivo LVDT, para definir la validación del sensor.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han registrado sismos devastadores para los países sudamericanos, como es el caso de Chile y Ecuador principalmente (Valdebenito *et al*. 2015; Lotto & Stein, 2016). Las pérdidas y daños ocasionados por estos eventos telúricos evidencian algunas deficiencias a la hora de predecir, estimar o monitorear las amenazas sísmicas y repercusiones en las estructuras existentes (Carrillo & Alcocer, 2011). Así la ingeniería sísmica tiene gran acción en la investigación del comportamiento de las estructuras ante estos fenómenos (Vargas *et al.* 2013).

Los sismos equivalen al rompimiento repentino de las placas en el interior del planeta Tierra. Esta liberación fuerte de energía produce una onda que genera el movimiento del terreno. La amenaza sísmica es denominada como el potencial que ocurran sismos de gran magnitud en una misma zona geográfica (Vargas *et al.* 2013).

El sismo de 16 de abril de 2016, en Ecuador, mostró la elevada vulnerabilidad de las estructuras aporticadas usadas tradicionalmente en el país (Cevallos *et al.* 2018). El mal funcionamiento en los sistemas de monitoreo y su alto costo de mantenimiento ocasionan que los equipos de prevención de desastres naturales, o personas que necesitan ser alertadas, queden expuestos sin poder tomar precauciones tempranas antes o después de un terremoto (Vargas *et al.* 2013).

En el área de medición de desplazamientos ante cargas dinámicas, dirigido a puentes ferroviarios en los Estados Unidos, hay investigaciones muy avanzadas que utilizan dispositivos y equipos de monitoreo de alta calidad. Estos enfoques a menudo requieren una costosa instrumentación para una medición confiable (Ozdagli *et al.* 2017). Estos métodos también se pueden usar en la medición de desplazamientos de edificios sometidos a movimientos telúricos, pero el problema seguirá siendo su alto costo de implementación.

Debido a la baja posibilidad de predecir un terremoto, los edificios no pueden ser equipados con sensores, ya que las baterías deben ser provistas, y en el momento del evento puede ser que el sensor no esté listo para tomar los datos necesarios y registrarlos. La desventaja principal de monitorear permanentemente una estructura es el costo de mantenimiento; tanto en personal como en equipo de monitoreo y sus repuestos. El costo promedio de acelerómetros comerciales es en varios casos alto, y mientras más precisión se desee el valor aumenta; por lo que se debe pensar en alternativas más económicas y de similar precisión al momento de recolectar datos de un evento sísmico y del comportamiento de las estructuras.

En la actualidad existen sensores de bajo costo que pueden funcionar para monitoreo de estructuras. En la Universidad de Nuevo México en los Estados Unidos, se realizó una investigación con sensores de bajo costo; específicamente utilizando el sensor Arduino UNO para la determinación de aceleraciones y posterior cálculo de los desplazamientos en estructuras de prueba.

Arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar (Vargas *et al.* 2013). Usado como sensor, conectado a un acelerómetro, capta las aceleraciones de la estructura en los tres ejes (X, Y y Z) enviando los datos a un ordenador. Esto se lo puede realizar vía alámbrica o inalámbrica por medio de una antena que envía las señales, como si estuviese conectado directamente.

En este sentido, podría pensarse en usar el sensor Arduino UNO para medir las vibraciones ambientales en forma periódica antes de la ocurrencia de un sismo, creando una bitácora de datos, que se pueda comparar con los resultados después de un sismo. Las diferencias indicarían el daño de la estructura, y puede usarse para la estimación de su extensión.

Por lo tanto, este documento propone la validación de dispositivos de bajo costo y de fácil manipulación para medir los desplazamientos en los edificios después de un gran terremoto. La propuesta utiliza el sensor llamado Arduino UNO, como sensor para medir aceleraciones y transformarlos en desplazamientos. Esto permitirá obtener los desplazamientos en el edificio de manera rápida y confiable, sin tener que recurrir a sistemas más sofisticados y costosos.

Basados en la vulnerabilidad de un edificio a las cargas dinámicas, que multiplica la variable de riesgo sísmico (que es una función del sitio de la base del edificio) (Aguiar *et al.* 2017), la interpretación de las vibraciones en los edificios es muy importante, por lo que el método propuesto recoge la aceleración medida por el sensor Arduino UNO, y usando el método propuesto por Ozdagli *et al*. (2017) y los filtros propuestos por Lee *et al.* (2009), calcula los desplazamientos estimados ante las cargas dinámicas aplicadas a las estructuras. Los resultados se compararán con los desplazamientos en tiempo real medidos por el sensor LVDT.

Primero, se describe la configuración de los ensayos en laboratorio y el funcionamiento de los sensores usados en la investigación. Segundo se conocen los principios utilizados para la estimación de los desplazamientos indirectos, generados de los datos de aceleración y rotación. Y por último se discute la validación de los datos obtenidos con el sensor propuesto Arduino UNO.

Todos los cálculos se los realizan con la ayuda de un código en Matlab generado por el autor.

La figura 1 muestra el proceso para transformar los datos de aceleración en desplazamientos totales.

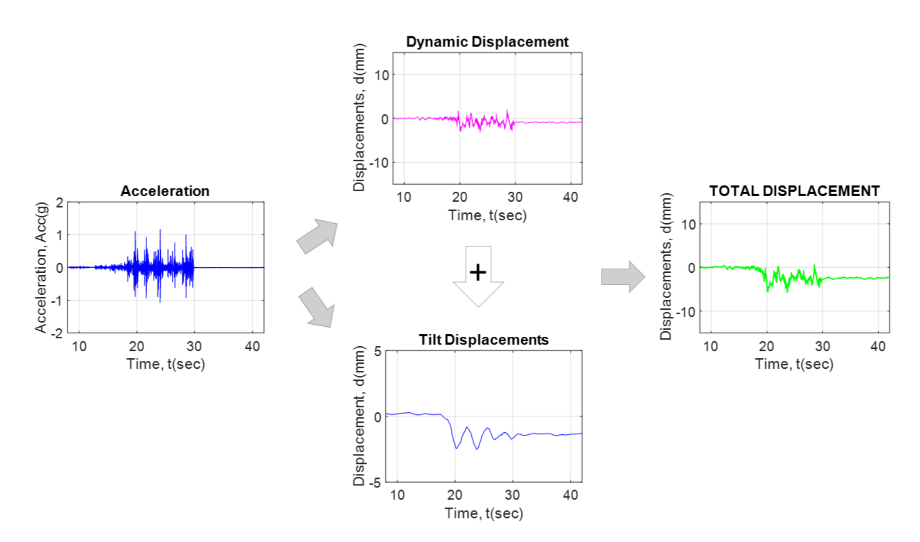


Figura 1 Concepto de estimación de desplazamientos en tiempo real.

2. CONFIGURACIÓN DE LOS ENSAYOS

Se utiliza el modelo de una columna de madera anclada a un marco de acero, simulando el modelo en voladizo para aplicar las fórmulas y obtener los desplazamientos con el sensor Arduino UNO a partir de las aceleraciones. La estructura de prueba está sujeta a la mesa vibratoria dispuesta en los laboratorios de la Universidad de Nuevo México, con la cual se generan las cargas dinámicas.

El modelo restringe todo movimiento en la parte superior de la columna de madera y permite el movimiento horizontal en la parte inferior. Por la configuración, esto genera ondas (ruido) en los datos obtenidos de aceleraciones, las cuales serán filtrados con el método de Lee *et al.* (2009). Se utilizó este modelo debido a que para mediciones ambientales en estructuras y posterior a un sismo, la mayor parte del tiempo existirán ondas de ruido que pueden generar errores en las mediciones, por lo que deben ser limpiadas y filtradas para una mejor aproximación de los resultados.

Se instalaron dos tipos de acelerómetros en el modelo de prueba. El primero, objeto de la investigación, es el sensor Arduino UNO. El segundo sensor son acelerómetros comerciales de bajo costo que miden aceleraciones en un solo sentido, por lo que se instalaron dos; para medir aceleraciones en el sentido X (horizontal) y Y (vertical).

Para la validación de los resultados, se instaló un sensor LVDT para la medición directa de los desplazamientos en tiempo real.

Las simulaciones se llevan a cabo a una velocidad de muestreo de 100 Hz, para el sensor Arduino y 1024 Hz para los acelerómetros y el sensor LVDT. Las respuestas resultantes, como el desplazamiento y la aceleración se registrarán durante 40-60 s, dependiendo de las cargas dinámicas aplicadas. La figura 2 y figura 3 representan el modelo utilizado en la investigación.

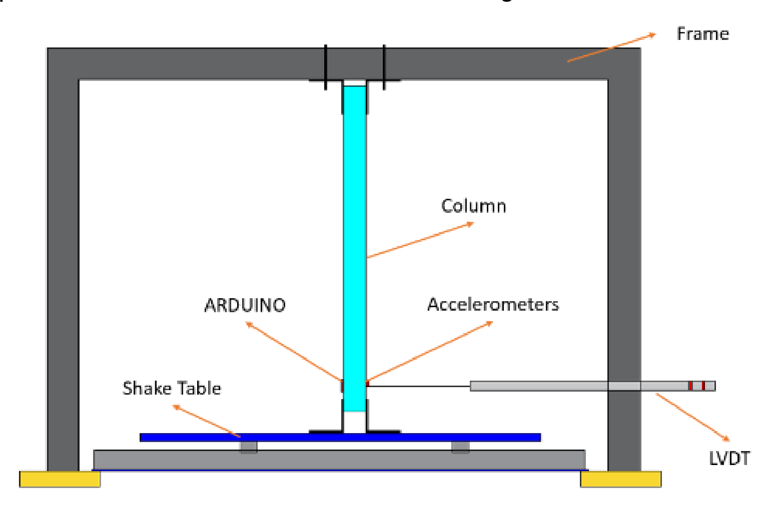


Figura 2 Configuración de los ensayos de laboratorio en la mesa de simulación sísmica.

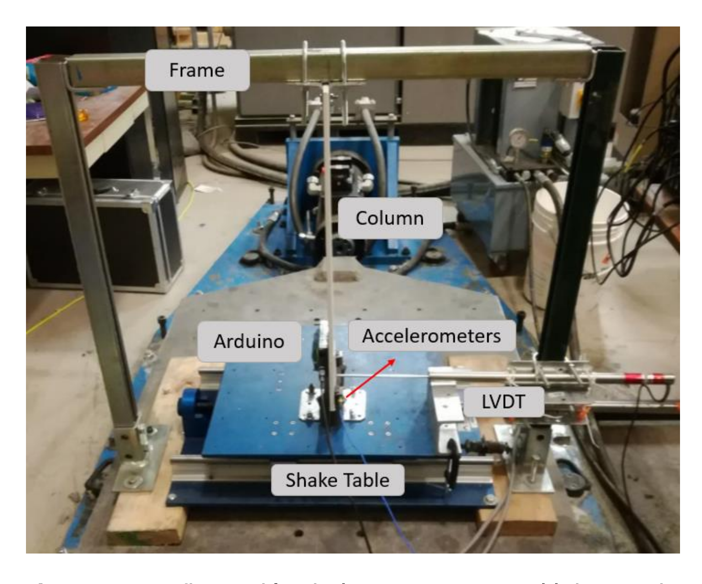


Figura 3 Configuración de los ensayos en el laboratorio.

El estudio considera un modelo bidimensional de una sola flexión de la columna de madera analizada. La columna tiene una altura total de 45.72 cm.

Los datos de aceleración y desplazamiento producidos en los acelerómetros y el sensor LVDT, a través de la simulación, se registran en el software SO Analyzer en tiempo real; a través de la caja VibPilot, que se muestra en la figura 4.



Figura 4 Caja VibPilot.

El software SO Analyzer, permite la recolección de los datos de aceleración y desplazamiento, respectivamente, de los sensores colocados en la estructura de prueba. Trabaja mediante la caja VibPilot, la cual transforma las señales de los sensores en señales digitales. Los datos generados en el sensor Arduino UNO son registrados por el software gratuito Arduino, donde los datos de aceleración se pueden almacenar en tiempo real.

Aunque las respuestas de simulación utilizadas en esta investigación se obtienen en el laboratorio y utilizan sensores cableados para una mayor precisión; el sensor Arduino UNO se puede utilizar con una antena y baterías, convirtiéndose en un sensor inalámbrico; y con la ayuda de una computadora de rango medio, las respuestas se pueden recopilar en campo y en tiempo real. Lo que lleva al objetivo del análisis de esta investigación, donde se propone el uso del sensor Arduino UNO, para la estimación de aceleraciones y desplazamientos en las estructuras.

3. SENSORES UTILIZADOS

Primero, los transductores de aceleración, comúnmente denominados acelerómetros, son los detectores de movimiento preferidos para aplicaciones de monitoreo de aceleración, ya que su operación está directamente relacionada con esta variable física (Hernández & Fabela, 2004). Estos instrumentos son útiles para mediciones de frecuencia muy baja y muy alta, y se puede encontrar una gran variedad comercial que cubre prácticamente cualquier tipo de aplicación, tanto para fines generales como para fines específicos. Los acelerómetros son los instrumentos más comúnmente utilizados en los sistemas de monitoreo y medición de vibraciones (Hernández & Fabela, 2004). En la figura 5 se muestran los acelerómetros usados en esta investigación; en la parte superior está colocado el acelerómetro para el eje Y (vertical) y en la parte inferior el acelerómetro para el eje X (horizontal).



Figura 5 Acelerómetros usados en la investigación. Eje Y (superior) y eje X (inferior).

En segundo lugar, la instrumentación propuesta en esta investigación, el Arduino UNO, es un sensor con varias partes que lo componen, y tiene como parte esencial un acelerómetro, que es el responsable de medir las aceleraciones producidas y, a través de la placa Arduino, transmite los datos directamente a la computadora del usuario. Utiliza un software gratuito llamado Arduino que recoge los datos del sensor y los guarda, además de tener la opción de presentar gráficos en tiempo real. En la figura 6 se puede observar las partes del sensor.

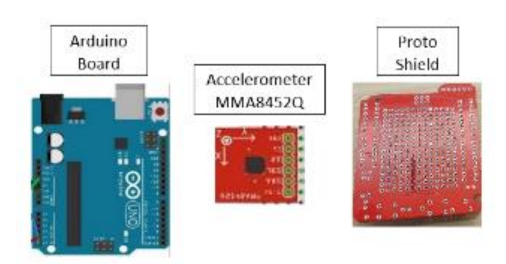


Figura 6 Piezas del sensor Arduino UNO.

Las piezas del sensor Arduino UNO se unen mediante cables jumper y se ensambla finalmente como se muestra en la figura 7.

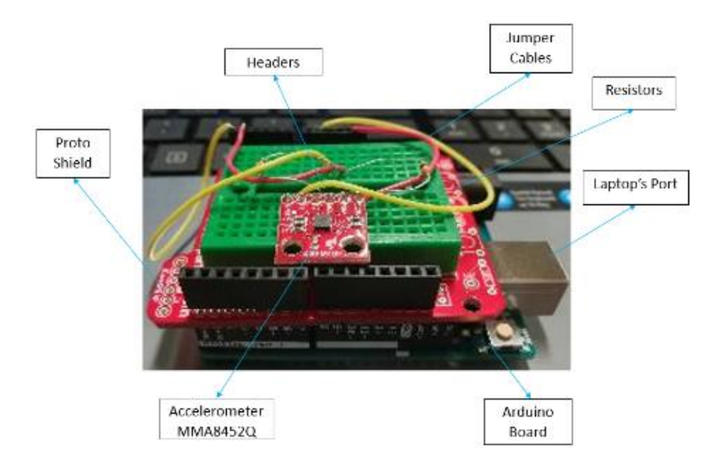


Figura 7 Sensor Arduino UNO usado en la investigación.

El acelerómetro incorporado en el sensor es el MMA8452Q que toma datos en los tres ejes X, Y y Z. En la figura 8 se muestra el sentido de los ejes en el sensor.

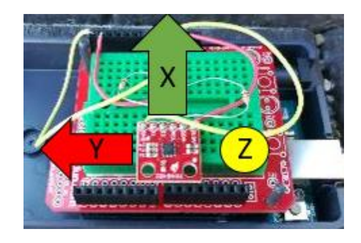


Figura 8 Ejes del sensor Arduino UNO.

Finalmente, para validar los resultados del sensor Arduino UNO, se utilizó sensores de transformador diferencial de variable lineal (LVDT por sus siglas en inglés) ampliamente utilizados en sistemas mecatrónicos hidráulicos y neumáticos para medir cantidades físicas como desplazamiento, fuerza o presión (Drumea *et al.* 2006). El sensor LVDT consta de dos bobinas magnéticas acopladas con un núcleo común y este sensor convierte el desplazamiento del núcleo en la variación de reluctancia del circuito magnético. Los sensores LVDT combinan una buena precisión (error del 0.1%) con un bajo costo (Drumea *et al.* 2006). En la figura 9 se muestra el sensor LVDT usado en la investigación.



Figura 9 LVDT usado en la investigación.

4. ESTIMACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS DINÁMICOS A PARTIR DE ACELERACIONES

En este artículo no se calculan los desplazamientos a partir de aceleraciones de la forma tradicional, tomando en cuenta que la aceleración es función del desplazamiento. Se usa el método de estimación de desplazamientos dinámicos propuesto por Ozdagli *et al.* (2017).

Para definir el desplazamiento dinámico, Ozdagli *et al.* (2017) menciona que el primer componente de la medición del desplazamiento transversal total, que se centra en el desplazamiento dinámico, este se extrae de los datos de aceleración y utiliza el filtro FIR propuesto por Lee *et al.* (2009) que puede aproximar el desplazamiento mediante una combinación lineal de aceleraciones medidas dentro de un intervalo de tiempo finito, escrito de la siguiente manera:

$$\Delta_d = (L^T\, L\; + \lambda^2 I)^{-1}\, L^T\, L_a \bar{a}(\Delta t)^2 = C\bar{a}(\Delta t)^2 \quad (1)$$

Donde Δ_d = desplazamiento dinámico estimado; Δ_t = incremento de tiempo; a¯ = aceleración medida; L = matriz de ponderación diagonal; L_a = operador integrador; l = factor de regularización óptimo; y C = matriz de coeficientes para la reconstrucción de desplazamiento.

Lee *et al.* (2009) sugirió un factor de regularización óptimo:

$$\lambda = 46.81 N^{-1.95} \quad (2)$$

Donde N = número de puntos de datos correspondientes a una ventana de tiempo finita. Para mejorar la precisión de la estimación, los investigadores utilizaron una ventana de tiempo superpuesta. Moreu *et al.* (2016) demostró la capacidad de este método para la estimación de desplazamientos dinámicos bajo cruces de trenes.

5. ESTIMACIÓN DE DESPLAZAMIENTO PSEUDOESTÁTICO A PARTIR DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN

El segundo componente de la medición de desplazamiento transversal total se centra en el desplazamiento pseudoestático, que se calcula procesando los datos obtenidos del acelerómetro (Ozdagli *et al.* 2017). Para extraer las señales de aceleración, se utiliza en este caso el filtro SMA propuesto por Lee *et al.* (2009). Aquí se calcula la inclinación, que luego se transformará en desplazamientos estimados.

Primero, la inclinación debe calcularse con la siguiente ecuación:

$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{Acc\ X}{Acc\ Z}\right) \tag{3}$$

Varios investigadores han desarrollado este método, que se ilustra en la figura 10, para una mejor comprensión.

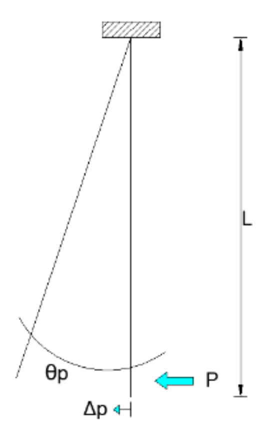


Figura 10 Modelo geométrico de un cantiliever.

La figura 10 muestra el proceso físico de un modelo geométrico de voladizo, para mostrar cómo medir la inclinación y luego el desplazamiento. Las siguientes fórmulas lo definen:

$$\Delta_p = \frac{PL^3}{3EI} \tag{4}$$

$$\theta_p = -\frac{PL^2}{2EI} \tag{5}$$

$$\Delta_p = -\frac{2}{3}\theta_p L \tag{6}$$

La ecuación 6 se usa para obtener los desplazamientos estimados, tanto con los acelerómetros como con el sensor Arduino UNO.

6. FUSIÓN DE DATOS

De acuerdo con Ozdagli *et al.* (2017), el enfoque del filtro FIR se extiende para acomodar la fusión de datos del sensor multimérico y, por lo tanto, mejora el rendimiento de la estimación. Al agregar el desplazamiento transversal dinámico (Δ_d) y el desplazamiento transversal pseudoestático (Δ_p), el desplazamiento transversal total (Δ_t) es:

$$\Delta_t = \Delta_d + \Delta_p \tag{7}$$

Generalmente, los acelerómetros y el sensor Arduino obtienen la inclinación que mide la rotación usando la gravedad como referencia (aceleraciones).

7. PERFIL DE CARGAS DINÁMICAS

El análisis simula cargas dinámicas aplicadas a la columna de madera, en este caso las cargas provienen de cruces de trenes, donde las vibraciones son grandes y dan validez a la metodología; estos representan operaciones reales de puentes ferroviarios de madera, lo que genera cargas dinámicas auténticas (Moreu *et al.* 2015). El tiempo de respuesta está limitado a t = 45 s. Se usa la simulación del Tren 3, que representa sus aceleraciones en la figura 11.

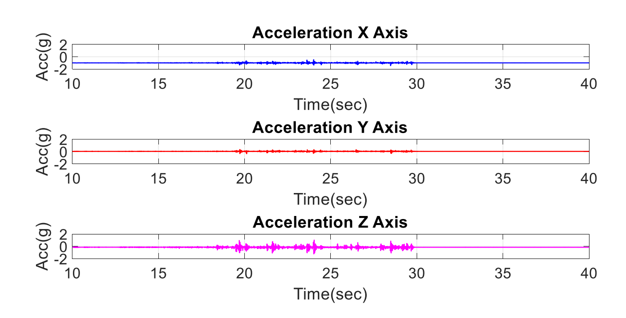


Figura 11 Aceleraciones del perfil de carga.

El sensor LVDT recopila los datos de los desplazamientos reales de la columna de madera, que se representan en la figura 12.

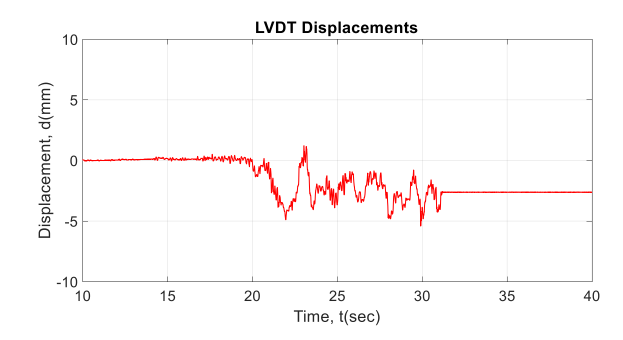


Figura 12 Desplazamientos medidos por el sensor LVDT, para el perfil de carga.

8. RESULTADOS DE SIMULACIÓN, COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN

La estimación dinámica se deriva de los datos de aceleración horizontal usando la ecuación 1. Se usa una ventana de 1,024 puntos para la construcción del filtro FIR, que no afecta el tiempo real porque es la velocidad de recopilación de datos. La respuesta pseudoestática se genera utilizando el filtro SMA (Lee *et al.* 2009), con la ecuación 6. Para el filtro SMA, se selecciona una ventana igual de 1,024 puntos para extraer la inclinación pseudoestática, lo que no ocasiona un retraso en tiempo real. Para lograr la sincronización en la comparación final, los resultados se desplazan más de 1,8 s, en el sensor Arduino UNO. Finalmente, la ecuación 7 se usa para determinar el desplazamiento transversal total estimado. La figura 13 y figura 14 muestran los desplazamientos pseudoestático (a partir de la inclinación) y dinámico, respectivamente, y la figura 15 muestra los resultados obtenidos una vez sumados los dos tipos de desplazamientos (desplazamiento total).

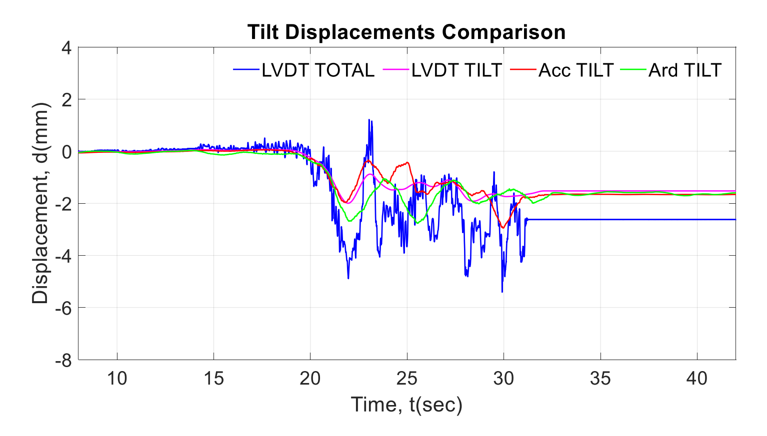


Figura 13 Desplazamiento pseudoestático.

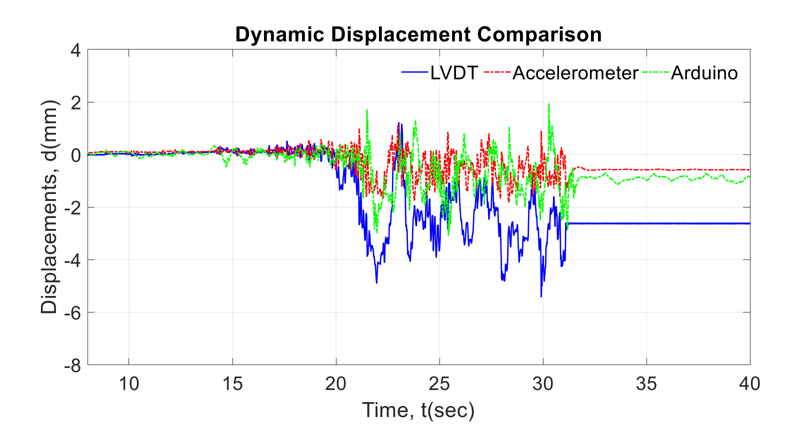


Figura 14 Desplazamientos dinámicos.

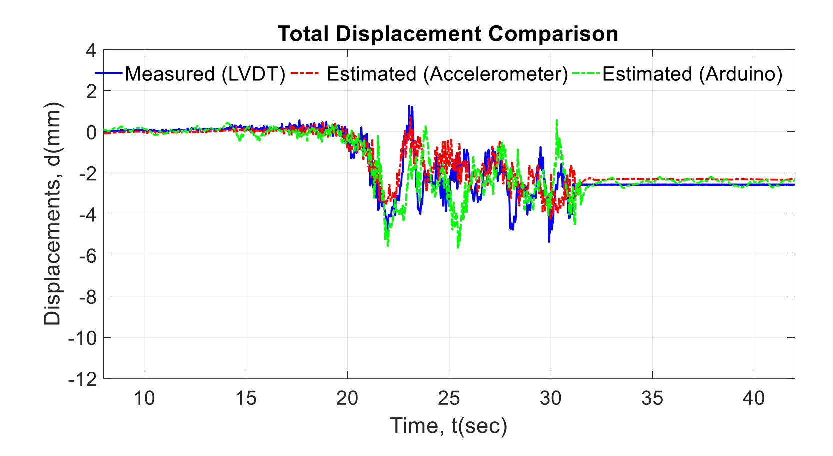


Figura 15 Desplazamientos totales.

Como se puede ver los desplazamientos totales estimados, tanto con los acelerómetros como con el sensor Arduino UNO, están cerca de los desplazamientos medidos con el sensor LVDT en toda la señal, los picos en ambos sensores (acelerómetros y Arduino UNO) no son los mismos que los del sensor LVDT; esto se debe a la configuración del ensayo que puede generar picos más altos o más bajos, pero no con un error trascendente.

De esta forma, se puede hacer la comparación final simplemente usando el sensor Arduino UNO, para validar su uso y capturar los desplazamientos totales en las estructuras. La figura 16 muestra la comparación final de los desplazamientos entre el sensor LVDT y el sensor Arduino UNO.

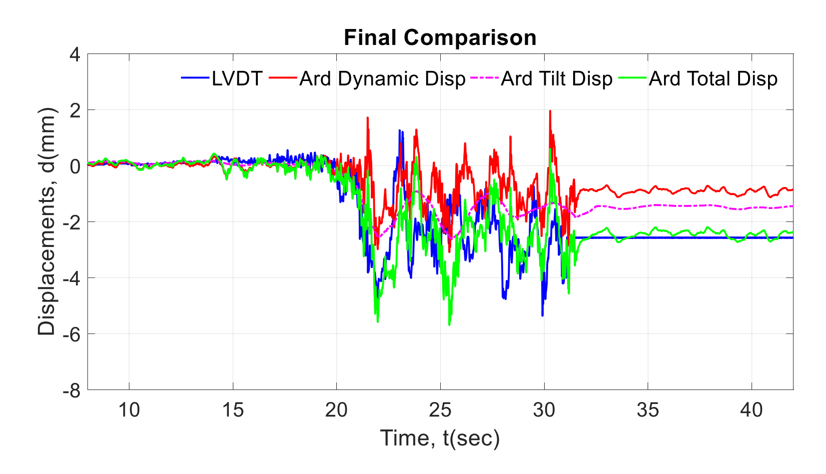


Figura 16 Comparación final. Arduino UNO vs LVDT.

La línea azul muestra los desplazamientos medidos con el sensor LVDT, la línea roja los desplazamientos dinámicos medidos con el sensor Arduino UNO, la línea magenta los desplazamientos procedentes de la inclinación del sensor Arduino UNO (desplazamiento pseudoestático), y la línea verde los desplazamientos totales estimados con el sensor Arduino.

Se muestra que las señales no regresan a cero en todos los sensores, lo que es normal y depende de la mesa vibratoria que al finalizar el ensayo no vuelve a su posición natural.

Finalmente, la figura 17 muestra la comparación de los desplazamientos totales de los sensores LVDT y Arduino UNO.

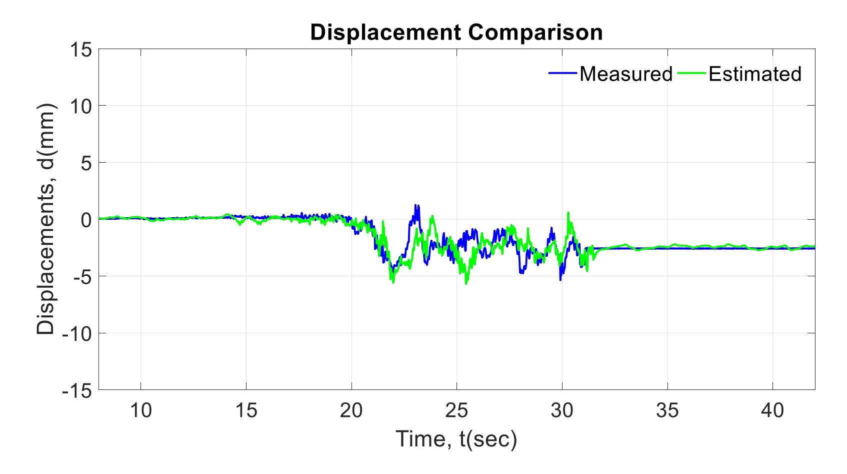


Figura 17 Desplazamientos totales. Arduino UNO vs LVDT.

Como se observa, los desplazamientos son muy cercanos en ambos sensores, lo que valida el uso del sensor Arduino UNO para la estimación de los desplazamientos. Este método se puede utilizar en el campo con la ayuda de una antena instalada en el sensor Arduino UNO y que envía las señales a una computadora portátil. Con esto se puede estimar las aceleraciones y los desplazamientos en edificios, de altitud media o alta, generados antes o después de cargas dinámicas fuertes (sismos). La figura 18 muestra los resultados obtenidos con otro perfil de carga, en donde se puede verificar que las señales de ambos sensores son relativamente iguales.

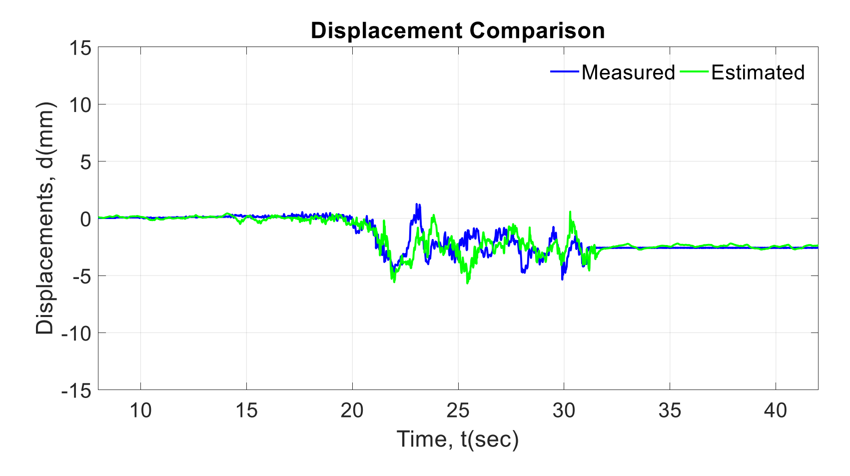


Figura 18 Comparación final de los desplazamientos totales con otro perfil de carga.

9. CONCLUSIONES

Este artículo presenta el uso del sensor Arduino UNO como un nuevo sensor de bajo costo para estimar el desplazamiento transversal en edificios sujetos a cargas dinámicas, a través de la validación de los datos.

Hay una variedad de técnicas y sensores para estimar los desplazamientos, pero al apostar por alternativas de bajo costo con un alto porcentaje de precisión, el sensor Arduino UNO es una opción muy viable.

Los sensores libres pueden depender de algunas condiciones estructurales, por lo que debido a cambios repentinos pueden generar errores en los picos, que deben descartarse en el análisis. Debido a que no es una estimación, estos problemas pueden ocurrir con cualquier tipo de sensor.

La técnica propuesta es útil tanto en puentes ferroviarios de madera como en edificios y estructuras habitables de mediana y gran altura.

El filtro FIR se utiliza para extraer los desplazamientos dinámicos de la aceleración. De la misma manera, el filtro SMA se usa para extraer la respuesta pseudoestática de los datos de inclinación que contiene la relación entre las aceleraciones en dos ejes de medición. Los dos tipos de filtros se complementan (suman) para obtener la estimación de desplazamiento total.

TRABAJOS FUTUROS

Una vez que los resultados del sensor Arduino UNO han sido validados para medir los desplazamientos en las estructuras, en este artículo. Como trabajo futuro, la instrumentación con sensores Arduino UNO se debe realizar en edificios medianos y altos, para medir las aceleraciones en las condiciones ambientales (aceleraciones de las fuerzas del viento) y para verificar los desplazamientos de edificios, especialmente edificios más altos en donde las vibraciones se pueden percibir en los últimos pisos.

Posteriormente, un segundo trabajo es la simulación de laboratorio de grandes terremotos que ocurrieron en todo el mundo y en Ecuador, para determinar los desplazamientos máximos que se produjeron y tener un parámetro de caracterización para el diseño de estructuras, proponiendo un cambio en las regulaciones con la restricción más severa de derivas en el piso, generando una conciencia más conservadora y un mejor análisis de las estructuras construidas en Ecuador. Esto ante la posibilidad de un terremoto de gran magnitud y destructivo para el país.

Como otro trabajo futuro, se debe tener los sensores organizados y preparados para su instalación inmediata después de un terremoto que pueda ocurrir, y así determinar si la estructura es adecuada para albergar personas o si debe ser desalojada y demolida.

AGRADECIMIENTOS

Se deja constancia del apoyo brindado por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, al primero de los autores, para que realice una estancia de investigación en University of New Mexico en los Estados Unidos.

Al Dr. Fernando Moreu por ser tutor del primero de los autores, en University of New Mexico, y por contribuir a la investigación donde se logró obtener un resultado positivo para las partes.

REFERENCIAS

1. A. Cevallos, A. Burbano, R. Moreano, and P, Caiza, (2018), “Vulnerabilidad de estructuras en base a los periodos de vibración,” *Revista Congreso de Ciencia y Tecnología*, **13 (1)**, 33-36. [en línea]. Disponible en: https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/cienciaytecnologia/issue/viewIssue/60/52.
2. A. Drumea, A. Vaslie, M. Comes, and M. Blejan, (2006), “System on Chip Signal Conditioner for LVDT Sensors,” *1st Electronic Systemintegration Technology Conference*, Dresden, Germany. [en línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/4060794/.
3. A. Ozdagli, J. Gomez, and F. Moreu, (2017), “Real-Time Reference-Free Displacement of Railroad Bridges during Train-Crossing Events,” *Journal of Bridge Engineering*, **22, (10),** October, 2017. [en línea]. Disponible en: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001113.
4. D. Vargas, E. Rodríguez, and J. Otero, “Alternativas para la detección y monitoreo de amenazas sísmicas basadas en arduino,” Revista Ingenierías USB Med, **4, (2)**, Julio-Diciembre, pp. 45-54, 2013, Medellín, Colombia. [en línea]. Disponible en: http://web.usbmed.edu.co/usbmed/fing/v4n2/v4n2a5.pdf.
5. F. Moreu, J. Li, H. Jo, R. Kim, (2016), “Reference-free displacements for condition assessment of timber railroad bridges,” *Journal of Bridge Engineering,* **21**, **(2)**, February, 2016. [en línea]. Disponible en: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0000805.
6. F. Moreu, J. Li, H. Jo, R. Kim, “Dynamic assessment of timber railroad bridges using displacements,” Journal of Bridge Engineering, Vol 20, Issue 10, October, 2015. [en línea]. Disponible en: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0000726. Consultado: 28 noviembre, 2017.
7. G. Lotto, and R. Stein, "Ecuador earthquakes: What happened and what's next? ," Temblor, julio, 2016. [en línea]. Disponible en: http://temblor.net/earthquake-insights/ecuadorearthquakes-what-happened-and-what-is-next-986/. Consultado: 01 mayo, 2018.
8. G. Valdebenito, D. Alvarado, C. Sandoval, and V. Aguilar, "Terremoto de Iquique Mw=8,2 - 01 abril 2014: daños observados y efectos de sitio en estructuras de albañilería," en XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015, Santiago de Chile, Chile, 18-20 de marzo, 2015. [en línea]. Disponible en: file:///C:/Users/Ronny%20Moreano/Downloads/221%20(1).pdf. Consultado: 03 julio,2018.

9. H. Lee, Y. Hong, and H. Park, “Design of a FIR filter for the displacement reconstruction using measured acceleration in low-frequency dominant structures,” International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol 82, No. 4, pp. 403-434, november, 2009. [en línea]. Disponible en: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nme.2769. Consultado: 24 noviembre, 2017.
10. J. Carrillo, and S. Alcocer, “Comportamiento a cortante de muros de concreto para vivienda” Revista de Ingeniería Sísmica, No. 85, pp. 103-126, julio-diciembre, 2011. [en línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2011000200004. Consultado: 03 julio, 2018.
11. J. Henández, and M. Fabela, “Esquema de instrumentación para determinar el ángulo de balanceo y la aceleración lateral en el movimiento oscilatorio de un péndulo,” Instituto Mexicano del Transporte, publicación técnica No. 248, 2004. [en línea]. Disponible en: https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt248.pdf. Consultado: 27 noviembre, 2017.
12. R. Aguiar, A. Ferrín, and M. Pilligua, “Comportamiento del bloque estructural de la facultad de comercio exterior de la ULEAM durante el terremoto del 16 de abril de 2016,” Revista Ciencia, Vol 18, No. 4, pp. 469-481, 2016.